

Wärmerückgewinnung in Trommeltrocknern

Autor(en): **Conde, Manuel R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 20

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79240>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Manuel R. Conde, Zürich

Wärmerückgewinnung in Trommeltrocknern

Wäsche trocknen ist ein energieintensiver Prozess, der vor allem in den Agglomerationen nur selten mit erneuerbaren Energien durchgeführt wird. Eingesetzt werden geheizte Trocknungsräume, Trocknungsschränke und Trommeltrockner, die elektrisch oder mit Heizwasser gespeist werden. In diesem Artikel wird die Entfeuchtung der Abluft durch die Erwärmung der Frischluft vorgeschlagen. Anhand von Messungen und Simulationen wird demonstriert, dass ein solches Vorgehen, im Gegensatz zu anderen teuren Lösungen, wie der Einsatz von Wärmepumpen, vom energetischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus günstig und zudem umweltfreundlich ist.

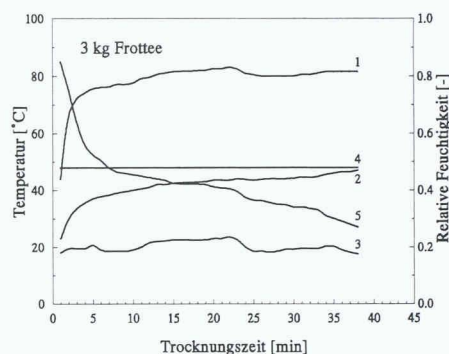
Der spezifische Energieverbrauch (kWh/kg trockene Wäsche - $\text{kWh/kg}_{\text{TW}}$) hängt vom Anlagentyp und von der Chargen gröss ab. Die gemessenen Werte liegen zwischen 0,8 für ein System mit Raumluftentfeuchter und 2,3 $\text{kWh/kg}_{\text{TW}}$ für einen Trockenschrank. Für Trommeltrockner liegt der spezifische Energieverbrauch zwischen 0,8 und 1,6 $\text{kWh/kg}_{\text{TW}}$. Der theoretische Minimalwert liegt bei etwa 0,50 $\text{kWh/kg}_{\text{TW}}$. Die Anwendung einer anderen Technologie zur Wäschetrocknung, nämlich der Einsatz von Wärmepumpen in Trommeltrocknern, die gleichzeitig als Lufterhitzer und Luftentfeuchter fungieren können, ist von Dietrich [3] und von Rödecker et al. [10] patentiert worden und war vor kurzem Gegenstand eines von Nipkow [9] durchgeführten Pilotprojektes. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage ist allerdings auch bei hoher Auslastung nicht gesichert. Zudem ist die Komplexität eines Wärmepumpen-Tumblers gegenüber einem konventionellen Tumbler erhöht, womit die Kapital- und Unterhaltskosten zunehmen. Mit der Komplexität des Systemes steigen auch die Anforderungen an das Servicepersonal und die Störungsanfälligkeit.

In diesem Artikel wird der Einsatz eines wärmerückgewinnenden Wärmeübertragers zur Energieeinsparung bei Trommeltrocknern diskutiert. Diese Lösung übertrifft zwar nicht das Energieeinsparungspotential einer Wärmepumpe, hat

aber den Vorteil, dass sie wesentlich einfacher und kostengünstiger ist. Anhand von Messungen an typischen Trocknungsgängen in Ablufttrommeltrocknern und Computersimulationen wird demonstriert, dass die Wärmerückgewinnung eine vorteilhafte Möglichkeit darstellt.

Einfluss der Trocknungstemperatur auf den Trocknungsverlauf

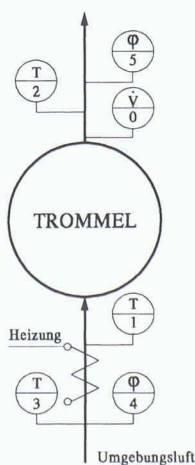
Die Luftvorlauftemperatur in Trommeltrocknern variiert je nach Einstellung zwischen 50°C und 90°C . Am häufigsten wird eine Luftvorlauftemperatur von etwa 80°C angewandt. Bei einem Ablufttumbler wird die Umgebungsluft durch elektrische Widerstände erhitzt, was zu einer Verminderung des Partialdruckes des Wasserdampfes in der Luft führt. Gleichzeitig erwärmt diese heisse Luft die feuchte Wäsche, so dass der Dampfdruck des Wassers in der Wäsche steigt. Die Differenz zwischen dem Dampfdruck des Wassers in der Wäsche und dem Partialdruck des Wasserdampfes in der warmen Luft stellt die eigentliche, treibende Kraft des Trocknungsprozesses dar. Nehmen wir an, dass ein Ablufttumbler mit Widerstandsheizung bei rund 500 m ü.M. mit einer Fortlufttemperatur von 80°C arbeitet, wobei die Umgebungsluft eine Temperatur von 20°C und eine relative Feuchtigkeit von etwa 50% besitzt. Die treibende Kraft - Differenz zwischen dem Wasserdampfdruck



2

Verlauf der gemessenen Grössen während der Trocknung von 3 kg Frotteewäsche in einem Ablufttumbler. Die Kurven zeigen: 1 - Verlauf der Fortlufttemperatur; 2 - Verlauf der Trommelablufttemperatur; 3 - Umgebungslufttemperatur; 4 - Relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft; 5 - Verlauf der relativen Feuchtigkeit in der Trommelabluft

an der Oberfläche der Wäsche und dem Wasserdampfpartialdruck der Luft am Trommleintritt, unter Berücksichtigung der Wasseraktivität der Wäsche - beträgt in diesem Fall rund 12 kPa. Im Gegensatz dazu kann ein mit Wärmepumpenheizung versehener Trommeltrockner wegen der Arbeitsweise der Wärmepumpe höchstens mit einer Fortlufttemperatur von 60°C betrieben werden. Bei gleichen Umgebungsbedingungen (20°C , 50% rF) beträgt die treibende Kraft in diesem Fall nur etwa 6 kPa. Dadurch verdoppelt sich die Trocknungszeit in einem mit Wärmepumpe ausgestatteten Tumbler im Vergleich zu einem konventionellen Trockner. Typische Wärmepumpen erreichen im stationären Betrieb unter den erwähnten Bedingungen nur selten eine mittlere Arbeitszahl um 3 - Verhältnis zwischen abgegebener Wärme im Verflüssiger und elektrischer Energieverbrauch des Verdichters. Angesichts der Tatsache, dass bei der Trommeltrocknung ein stationärer Arbeitszustand praktisch nie erreicht wird, liegt die mittlere Arbeitszahl noch tiefer. Hinzu kommt, dass die Bedingungen für den mit Wärmepumpe ausgerüsteten Tumbler in der Endphase der Trocknung nachteilhafter werden, da die Wasseraktivität der Wäsche sinkt und die Temperatur in der Trommel steigt. Daraus folgt, dass der Energieverbrauch eines mit Wärmepumpe ausgerüsteten Trommeltrockners gegenüber widerstandserhitzten Tumbleren nicht halbiert werden kann.

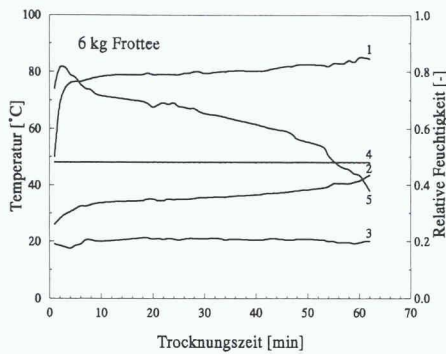


1

Schematische Darstellung und Ortung der Sensoren für die Messung des Trocknungsablaufes

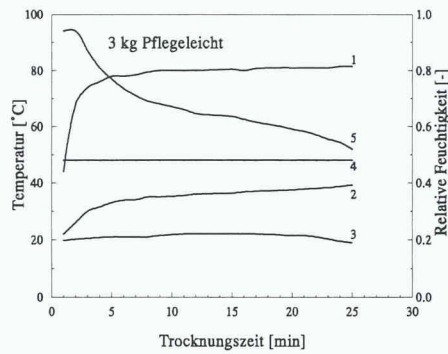
Typische Wäschetrocknungsverläufe in Trommeltrocknern

Der Verlauf der Wäschetrocknung in Trommeltrocknern hängt von der Chargen gröss, vom Wäschemix und vom Zustand



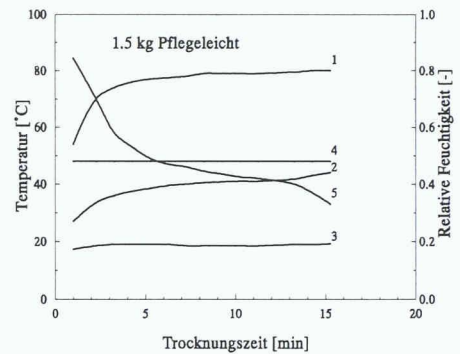
3

Verlauf der gemessenen Grössen während der Trocknung von 6 kg Frotteewäsche in einem Ablufttumbler. Kurvenbezeichnung wie in Bild 2



4

Verlauf der gemessenen Grössen während der Trocknung von 3 kg pflegeleichter Wäsche in einem Ablufttumbler. Kurvenbezeichnung wie in Bild 2



5

Verlauf der gemessenen Grössen während der Trocknung von 1,5 kg pflegeleichter Wäsche in einem Ablufttumbler. Kurvenbezeichnung wie in Bild 2

der Umgebungsluft des Ablufttumblers ab. Die Trocknungsverläufe für vier typische Trocknungsgänge wurden von Gygli [4] an einem halbgewerblichen Ablufttumbler messtechnisch erfasst. In Bild 1 sind die Messgrössen und die Ortung der Sensoren schematisch dargestellt. In Bild 2 bis 5 sind die Messungen der Trocknung von 3 kg und 6 kg Frotteewäsche und von 3 kg und 1,5 kg pflegeleichter Wäsche dargestellt. Es wurden jeweils die Fortlufttemperatur (Kurve 1), die Trommelablufttemperatur (Kurve 2), die Umgebungslufttemperatur (Kurve 3), die relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft (Kurve 4) und die relative Feuchtigkeit der Trommelabluft (Kurve 5) in Abhängigkeit der Trocknungszeit gemessen. Eine weitere wichtige Grösse ist der Luftdurchsatz, dessen Messung allerdings aufwendig ist. Die Messungen der Luftdurchsätze sind mit Unsicherheiten behaftet, die einerseits auf die Messmethode und andererseits auf Zügeffekte zurückzuführen sind. Zügeffekte treten in Trommeltrocknern wegen Undichtigkeiten auf und erschweren die Messung des Luftdurchsatzes. Wenn die Luft durchgesaugt wird, wird der Luftdurchsatz am Austritt wahrscheinlich grösser sein als der effektive Luftdurchsatz. Beim Durchblasen der Luft tritt das Gegenteil auf. Für die nachfolgenden Berechnungen wurde daher ein mittlerer Luftdurchsatz von $250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ angenommen, was ungefähr 50 kg h^{-1} pro kg trockener Wäsche einer Standardcharge entspricht.

Wärmerückgewinnung in Trommeltrocknern

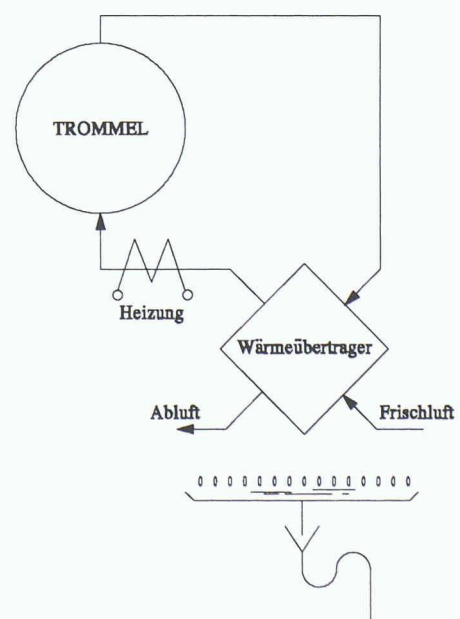
Die Abluft von Trommeltrocknern ist, wie Kurven 2 und 5 in Bild 2 bis 5 zeigen, wärmer und feuchter als die Umgebungsluft,

die für die Trocknung mit wertvoller elektrischer Energie geheizt werden muss. Thermodynamisch gesehen ist es daher sinnvoll, das thermische Potential der Abluft zur Erwärmung der Frischluft zunächst auszuschöpfen, bevor die elektrische Heizung eingeschaltet wird, wie in Bild 6 schematisch dargestellt ist. Die Frischluft wird dabei mittels eines Wärmeübertragers durch die Abluft erwärmt. In der Folge wird der Einsatz eines wärmerückgewinnenden Wärmeübertragers durch Computersimulation untersucht. Die untersuchte Konfiguration ist in Bild 6 schematisch dargestellt. Als Grundlage für die Berechnungen dienen die oben gezeigten Messungen und Annahmen.

Für die Wärmerückgewinnung in dieser Anwendung sind Kompaktwärmeübertrager (KWT, häufig als «Wärmeaustauschblöcke» bezeichnet) im Sinne von Kays und London [5] sehr geeignet. Verformte Lamellentypen sind allerdings, wegen der Verstopfungsfahr durch Flusen, zu vermeiden.

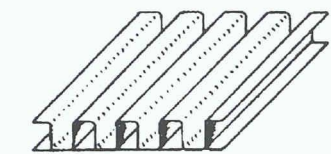
In dieser Studie wurden nur glatte Lamellen des Typs (b) in Bild 7 berücksichtigt. Mit einem speziell für diesen Zweck entwickelten Computersimulationsprogramm [2] wurde der Wärmeübertrager simuliert, um dessen Energieeinsparungspotential zu eruieren. Es wurden verschiedene Grössen einer gleichen Wärmeübertragerkonfiguration in die Simulationen einbezogen (Bild 8). Die Simulationsergebnisse der Trocknung einer Charge von 6 kg Frottee zeigen, dass die optimale Grösse des Wärmeübertragers bei etwa $400 \times 400 \times 100 \text{ mm}$ liegt (Maximalwert der Kurve 4 in Bild 9). Die selben Schlussfolgerungen ergeben die Simulationen der weiteren Trocknungsabläufe. Die Tabelle (10) zeigt eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für alle gemessenen Trock-

nungsabläufe. Wie aus der Spalte GEEV zu entnehmen ist, liegt das Energieeinsparungspotential zwischen 10 und 17% der zur Lufterwärmung benötigten elektrischen Energie. Da der effektive Luftdurchsatz wahrscheinlich bis zu 30% tiefer als die getroffene Annahme ist, dürfte die effektive Energieeinsparung um 20% liegen. Genaue Messungen des Luftdurchsatzes sind für eine definitive Abklärung dieses Aspektes notwendig.

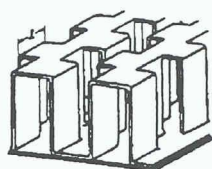


6

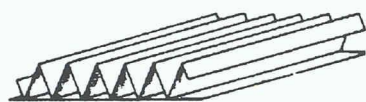
Schematische Darstellung des Einsatzes eines wärmerückgewinnenden Wärmeübertragers in einem Ablufttumbler



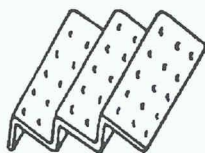
(a)



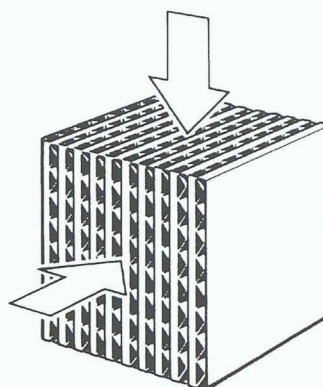
(d)



(b)

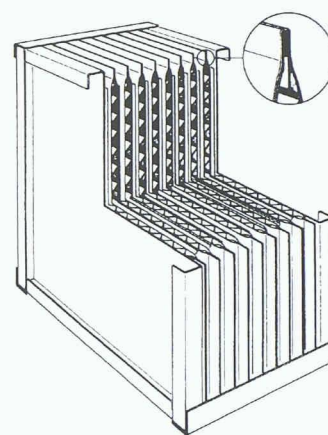


(e)



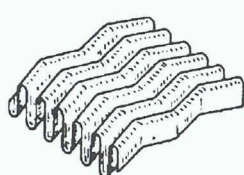
8

Konfiguration eines Kompaktwärmeübertragers wie er für den Einsatz in Trommeltrocknern vorgeschlagen wird (Müller 1994)

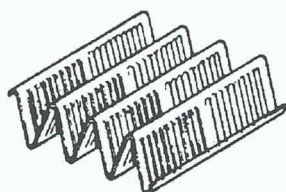


7

Verschiedene Typen von Lamellen, die in Kompaktwärmeübertragern benutzt werden (Webb 1987)



(c)



(f)

Ist der Einsatz von wärmerückgewinnenden Wärmeübertragern in Trommeltrocknern sinnvoll?

Nach Nipkow [7] benötigt die Wäschetrocknung mit Trommeltrocknern in den schweizerischen Haushalten 0,5% des gesamten Landeselektroenergieverbrauches. Eine Erhöhung der Trocknungseffizienz um 20% wäre auf Landesebene kaum spürbar, wäre aber für den einzelnen Haushalt von Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung lässt sich leicht demonstrieren. Viele Tumbler sind bereits heute mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager ausgerüstet, mit dem Ziel, die Trocknungsluft durch Abkühlung (mit Luft oder Wasser) zu entfeuchten und somit einen geschlossenen Kreislauf der Trocknungsluft zu ermöglichen. Dabei sollte keine Feuchtigkeit von der Trocknungsluft an die Umgebungsluft abgegeben werden, um die Gebäudestruktur zu schonen. Dieses Prozedere hat allerdings gewichtige Nachteile: Die aus der Abluft gewonnene Wärme geht an die Umgebungsluft oder im Abwasser verloren, und in der Praxis wird trotz dieser Massnahme Feuchtigkeit im Raum freigesetzt. Im Fall der Entfeuchtung mit Luft wird durch die Abgabe der Wärme im Raum die Raumlufttemperatur erhöht, was wiederum die Entfeuchtungskapazität des Wärmeübertragers senkt. Dabei wird die treibende Kraft zur Wasserverdunstung in der Trommel reduziert,

was zu einer Verlängerung der Trocknungszeit führt. Bei der Kühlung der Trocknungsluft mit Wasser werden 10 bis 15 kg h⁻¹ Wasser/kg_{WT} benötigt.

Im folgenden wird die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung anhand eines Beispiels gezeigt. Ausgegangen wird vom ungünstigsten Fall, nämlich einem Ablufttumbler ohne Kondensationszusatz. Ferner sei angenommen, dass etwa 1000 Trocknungsgänge pro Jahr mit durch-

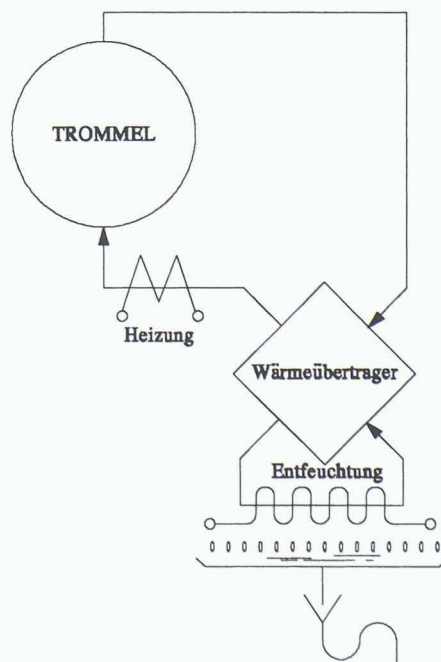
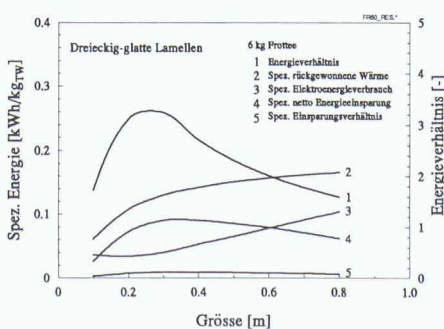
schnittlich 4 kg_{TW} pro Gang durchgeführt werden. Weiter wird angenommen, dass die von Gygli [4] gemessenen Trocknungsverläufe und der geschätzte Luftdurchsatz stimmen. Aufgrund der Simulationsergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass mit dem hier beschriebenen Wärmeübertrager im Durchschnitt 0,125 kWh/kg_{TW} rückgewonnen werden kann. Dies ergibt eine Einsparung von 100 CHF/Jahr, wenn der Hochtariff von 0,20

10

Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für einen 400×400×100 mm Wärmeübertrager

9

Resultate der Simulation des Einsatzes von wärmerückgewinnenden Wärmeübertragern in einem Ablufttumbler bei der Trocknung von 6 kg Frotteewäsche



Versuch	WEV	STWR	SEEV	SNEE	STEW	GEEV	SWV	MH20
6 kg Frottee	2.702	0.142	0.053	0.090	0.810	0.111	0.692	0.387
3 kg Frottee	3.500	0.230	0.066	0.164	0.979	0.168	0.911	0.091
3 kg Pflegeleicht	2.415	0.102	0.042	0.060	0.623	0.096	0.682	0.143
1,5 kg Pflegeleicht	3.374	0.178	0.053	0.125	0.772	0.162	0.829	0.067

Erläuterungen:

WEV	Verhältnis der rückgewonnenen Wärme zum elektrischen Energieverbrauch (SEEV/STWR) [-]
STWR	Spez. rückgewonnene Wärme [kWh/kg _{TW}]
SEEV	Spez. elektrischer Energieverbrauch [kWh/kg _{TW}] (mehr Energieverbrauch für den Ventilator)
SNEE	Spez. netto Energieeinsparung (STWR-SEEN) [kWh/kg _{TW}]
STEW	Spez. total eingespeiste Wärme (nur Lufterhitzung) [kWh/kg _{TW}]
GEEV	Gesamtes Energieeinsparungsverhältnis (SNEE/STEW) [-]
SWV	Sensibler Wärmeanteil [-]
MH20	Abgeschiedene Menge Wasser im Wärmeübertrager [kg]

11

Schematische Darstellung des Einsatzes eines wärmerückgewinnenden Wärmeübertragers in einem mit Kondensationsvorrichtung ausgerüsteten Tumbler

CHF/kWh angenommen wird. Der Wärmeübertrager selber kostet etwa 90 CHF für kleine Serien. Der Mehraufwand bei der Montage und sämtliche Zusatzteile dürften die Kosten um rund 50% erhöhen. Daraus geht hervor, dass eine solche Vorrichtung in weniger als zwei Jahren sicher amortisiert werden kann. Obwohl die Berechnungen anhand von Messungen an einem einzigen Tumbler typ durchgeföhrt wurden, kann man davon ausgehen, dass die spezifischen Werte auch für andere Tumblergrössen als Anhaltspunkt gelten. Bei grösseren Tumbler dürfte sich die Wirtschaftlichkeit einer Wärmerückgewinnung noch verbessern, da die Kosten des Wärmeübertragers im Verhältnis zu den Gesamtkosten günstiger ausfallen als bei Kleinanlagen. Der Einsatz von wärmerückgewinnenden Wärmeübertragern ist ebenfalls in Kondensationstumbler vorstellbar, wie in Bild 11 schematisch gezeigt wird, wobei das Wärmerückgewinnungspotential geringer als bei Ablufttumbler ausfällt. Gegenwärtig sind allerdings keine Messdaten an Kondensationstumbler vorhanden, um diese Voraussage zu quantifizieren.

Alle notwendigen Komponenten für die hier vorgeschlagene Anwendung sind

auf dem Markt vorhanden, was natürlich die Suche nach den tiefsten Preisen erleichtert. Die Verstopfungsgefahr des Wärmeübertragers durch Flusen ist nicht grösser als bei konventionellen Trocknern mit Kondensationsvorrichtung. Durch den Einsatz von geeigneten Filtern kann dieses Problem vermindert oder sogar vermieden werden.

Zusammenfassung

Der Anteil des gesamten Landeselektroenergieverbrauches, der für Wäschetrocknung mit Trommeltrocknern benötigt wird, liegt bei 0,5%. Viele der heute eingesetzten Tumbler sind mit Kondensationsvorrichtungen ausgerüstet, um die Abgabe der Feuchtigkeit an die Umgebungsluft zu vermeiden und die Gebäude vor Feuchteschäden zu schützen. Dabei wird allerdings nicht vom Erwärmungspotential der Trommelabluft profitiert. Zudem werden längere Trocknungszeiten benötigt, da die Absenkung der Luftfeuchtigkeit im geschlossenen Kreislauf durch die sensible Erwärmung der Umgebungsluft begrenzt ist. Die präsentierten Messungen und Simulationen zeigen auf, dass die Entfeuch-

Literatur

- [1] Conde, M.R.: Luftbezogene Prozesse, Zwischenbericht zum Unterauftrag Prozesssimulation. DIS-Projekt Nr. 10709, M. Conde Engineering, Zürich, 1994 (unveröffentlicht)
- [2] Conde, M.R.: Recovery - A Simulation Program for Compact Plate-Fin Heat Exchangers. Internal Report, M. Conde Engineering, Zürich, 1995
- [3] Dietrich, H.-J.: Deutsches Patent 3407439, 1984
- [4] Gjgli, W.: Persönliche Mitteilung, 1995
- [5] Kays, W.M., London, A.L.: Compact Heat Exchangers. McGraw-Hill, New York, 1984
- [6] Müller, P.: Persönliche Mitteilung der Polybloc AG, 1994
- [7] Nipkow, J.: Systeme der Wäschetrocknung, Infel Info, 3, 2-9, Zürich, 1993
- [8] Nipkow, J.: Verbrauchsmessungen an Wäschetrocknungssystemen. Infel Info, 3, 9-13, Zürich, 1993
- [9] Nipkow, J., Caderas, H.P.: Wärmepumpen-Tumbler. Schlussbericht zum DIS-Projekt Nr. 10709, Arena Arbeitsgemeinschaft, Zürich, 1996
- [10] Rodecker, A. et al.: Deutsches Patent 402300, 1992
- [11] Webb, R.L.: Enhancement of Single Phase Heat Transfer. In Handbook of Single Phase Heat Transfer, Chap. 17, Ed.s S. Kakaç, R.K. Shah, W. Aung, Wiley, New York, 1987

tung der Abluft durch die Erwärmung der Frischluft im Gegensatz zu anderen teuren Lösungen, wie etwa durch den Einsatz von Wärmepumpen, vom energetischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus günstig und umweltfreundlich ist.

Adresse des Verfassers:

Manuel R. Conde, Dr. sc. techn. ETHZ, M. Conde Engineering, Stampfenbrunnenstrasse 24, 8048 Zürich